

核电机械设备安装常见问题及应对策略

滕 政

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 核电机械设备安装因安全关联性强、结构工况复杂及可靠性要求极致,需严格遵循毫米级精度、100%焊接探伤等严苛标准。本文针对安装过程中基础施工、设备定位对接、连接质量、环境适配及人员管理五大类常见问题,深入分析地质勘察不足、测量精度不够、工艺执行不规范等核心成因,提出涵盖设计优化、精准定位、全链条质量管控、全阶段防护及人员管理优化的应对策略。进一步构建包含标准完善、过程监测预警、验收评价优化的质量保障体系,旨在提升核电机械设备安装质量、保障设备长期稳定运行提供技术支撑与实践参考。

关键词: 核电; 机械设备安装; 常见问题; 应对策略

引言: 核电作为清洁高效能源,其安全稳定运行高度依赖机械设备安装质量。此类设备具有安全关联度高、结构精密复杂、服役周期长等特殊属性,对安装精度、强度、密封性等的要求远超常规设备。但实际安装中,受基础施工偏差、设备定位不准、连接质量缺陷、环境适配不当及人员管理疏漏等因素影响,质量问题频发,既影响进度,更对核电安全构成潜在风险。因此,系统分析其核心特性与技术要求,精准识别常见问题及成因,制定应对策略并构建质量保障体系,对提升安装质量、防范安全风险、保障核电项目稳定运营具有重要理论与现实意义。

1 核电机械设备安装的核心特性与技术要求

1.1 核电机械设备的特殊性

核电机械设备的特殊性集中体现在三个维度:一是安全关联性极强,设备运行直接涉及核燃料处理、能量转换及放射性物质控制,任何安装缺陷都可能引发安全风险。二是结构与工况复杂,设备多为定制化设计,结构精密且集成度高,涵盖压力容器、主泵、蒸汽发生器等关键部件,需在高温、高压、强辐射等特殊工况下长期服役。三是可靠性要求极致,设备使用寿命通常长达40年以上,安装质量需满足长期稳定运行需求,且维修难度大、成本高,对安装精度和耐久性提出严苛要求^[1]。

1.2 安装关键技术指标与标准

安装关键技术指标围绕精度、强度、密封性和兼容性展开:精度方面,核心设备定位偏差需控制在毫米级,螺栓紧固力矩误差不超过设计值的 $\pm 3\%$;强度要求安装节点的承载能力达到设备额定负荷的1.2倍以上,焊接接头探伤合格率100%;密封性上,承压设备打压试验无渗漏,泄漏率符合百万分之三的严苛标准;兼容性则要求设备与系统接口尺寸匹配、材质相容,避免电化学腐蚀或机

械干涉。技术标准需遵循核电行业专用规范,涵盖材料检验、工艺实施、成品检测等全流程,确保安装质量的一致性和可靠性。

2 核电机械设备安装常见问题分类及成因分析

2.1 基础施工相关问题

基础施工常见问题包括混凝土基础沉降不均匀、预埋螺栓位置偏差超标、基础表面平整度不符合要求。成因主要有三点:一是地质勘察数据不准确,未充分考虑土壤承载力差异或地下水影响,导致基础设计参数不合理;二是施工过程中混凝土浇筑振捣不充分,养护时间不足,造成结构强度不足或收缩变形;三是预埋螺栓固定措施不完善,浇筑过程中受混凝土侧压力影响发生位移,且未及时进行复核调整。这些问题会直接影响设备安装的平整度和稳定性,引发后续运行中的振动隐患。

2.2 设备定位与对接问题

设备定位偏差过大、管口对接不同心、法兰密封面贴合不良是此类核心问题。成因包括:测量工具精度不足或校准不及时,导致定位基准数据失真;设备运输或吊装过程中发生变形,未进行预处理就直接安装;安装人员操作不规范,未严格按照定位方案执行,缺乏实时复核机制;且环境温度变化引发的设备热胀冷缩也会影响对接精度,尤其在大型设备安装中更为明显。该类问题会导致设备受力不均,加速磨损,甚至影响系统介质流通效率。

2.3 连接质量问题

连接质量问题主要表现为焊接接头缺陷、螺栓紧固不到位、密封件失效。焊接缺陷的成因包括焊接材料选型不当、焊接参数设置不合理、焊工操作技能不足,导致焊缝出现气孔、夹渣、未焊透等问题;螺栓紧固问题源于未使用专用力矩工具,紧固顺序混乱,或未考虑螺

栓的热膨胀系数,导致预紧力不足或过度紧固;密封件失效则与密封面加工精度不够、密封材料老化或安装时存在杂质有关。这些问题会引发介质泄漏、结构松动等安全隐患,严重时可能导致设备停机。

2.4 设备保护与环境适配问题

设备保护不当易造成表面腐蚀、部件损坏,环境适配不足则表现为设备运行温度异常、绝缘性能下降。成因包括:安装过程中未采取有效的防护措施,设备表面受到碰撞、划伤或沾染腐蚀性介质;存储环境湿度超标、粉尘过多,导致精密部件锈蚀或堵塞;安装区域温度、湿度未控制在设备要求范围内,超出设备适应的环境参数区间;振动传导未得到有效隔离,外部振动影响设备内部精密结构,也会导致设备性能衰减。

2.5 人员与管理相关问题

该类问题涵盖操作失误、流程执行不规范、质量管控缺失。成因主要有:施工人员缺乏系统培训,对核电设备安装的技术要求理解不透彻,专业技能不足;管理制度不完善,缺乏明确的岗位职责分工和操作流程规范,导致施工过程混乱;质量检查机制不健全,未执行“三检制”,对安装过程中的隐患未能及时发现和整改;施工进度安排不合理,为赶工期而简化操作流程,也是引发问题的重要原因。人员与管理漏洞会放大技术层面的潜在风险,导致各类安装问题集中爆发^[2]。

3 核机械设备安装常见问题的应对策略

3.1 基础施工质量控制策略

基础施工质量控制需从设计、施工、验收三个阶段入手。设计阶段要强化地质勘察,结合现场实际情况优化基础结构设计,明确混凝土强度等级、配筋方案及预埋部件固定方式;施工前对施工人员进行专项技术交底,明确质量控制点。施工过程中,采用高精度水准仪和经纬仪实时监测混凝土浇筑过程,控制振捣频率在每分钟50-70次,确保振捣均匀;预埋螺栓采用双固定支架体系,浇筑前后分别进行3次定位复核,偏差超过2mm时立即调整;混凝土养护时间不少于14天,养护期间控制环境湿度在60%-80%。验收阶段需对基础沉降进行为期30天的观测,沉降速率稳定在0.02mm/d以下方可进行设备安装,同时采用激光平整度检测仪检测基础表面,误差不超过3mm/米。

3.2 设备定位与对接精准化策略

实现精准定位与对接需构建“基准控制-实时监测-误差修正”的全流程体系。建立统一的测量基准网,选用精度达0.01mm/m的激光跟踪仪作为核心测量设备,安装前对设备进行预组装调试,消除运输变形影响。吊装

过程中采用四点同步起吊技术,控制起吊速度不超过0.5m/min,避免设备摆动。定位时遵循“先粗调后精调”原则,粗调阶段将偏差控制在10mm以内,精调阶段通过微调装置逐步修正,每调整一次进行一次数据复核,确保核心设备定位偏差不超过0.5mm。管口对接前采用专用对口器固定,控制同轴度误差在0.3mm/m以内,同时考虑环境温度影响,选择在温度波动不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的时段进行对接作业,必要时采取保温或降温措施^[3]。

3.3 连接质量保障策略

连接质量保障需强化材料、工艺、检测的全链条管控。焊接环节,根据设备材质选用匹配的焊接材料,预热温度控制在80-200 $^{\circ}\text{C}$ 之间,采用窄间隙埋弧焊等先进工艺,焊接过程中使用焊缝跟踪系统实时监控,每道焊缝焊接完成后立即进行外观检查,内部质量采用超声波探伤和射线检测双重验证。螺栓紧固采用智能力矩扳手,设定精准的预紧力参数,按照“对称分布、分步紧固”的原则执行,分3次完成紧固操作,每次紧固后停留5分钟再进行下一次,确保预紧力均匀传递;紧固后采用扭矩转角法进行复核,偏差超过 $\pm 5\%$ 的立即重新紧固。密封连接前,对密封面进行彻底清理,去除杂质和氧化层,选用耐温、耐压性能符合要求的密封件,安装时控制螺栓压紧力均匀,确保密封面贴合度达到95%以上。

3.4 设备保护与环境适配策略

设备保护需建立“存储-运输-安装”全阶段防护机制。存储期间,设备放置在干燥、通风的专用库房,地面铺设防滑防潮垫,精密部件采用密封包装,定期进行外观检查和防锈处理;运输过程中采用专用运输工具,配备缓冲装置,控制运输速度不超过60km/h,避免剧烈颠簸。安装时,设备表面覆盖保护膜,避免焊接飞溅、粉尘污染,关键部件安装后立即进行临时保护^[4]。环境适配方面,安装区域设置温湿度控制系统,将温度控制在15-30 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度不超过70%;针对强振动区域,设备底部需安装减震器;对于高温设备,预留足够的散热空间,设置隔热防护层;在多介质接触的设备接口处,采用防腐涂层和绝缘垫片,避免电化学腐蚀。

3.5 人员与管理优化策略

人员管理方面,建立“培训-考核-上岗”的准入机制,所有施工人员需接受专业培训,涵盖设备原理、安装规范、安全操作等内容,考核合格后颁发专项上岗证书;定期组织技能竞赛和技术交流活动,更新知识体系,提升实操能力。管理制度上,制定详细的施工组织设计和作业指导书,明确各岗位职责和操作流程,推行“谁施工、谁负责”的质量责任制。质量管控方面,严格执

行“三检制”，每道工序完成后由施工班组自检、技术人员互检、质量专员专检，关键工序设置5个质量控制点，实行旁站监督；建立质量问题台账，对发现的问题明确整改责任人、整改措施和整改期限，整改完成后进行复查销项。

4 核机械设备安装质量保障体系构建

4.1 质量标准体系完善

质量标准体系是核机械设备安装的基础依据，其完善性直接决定质量管控的有效性。需立足核机械设备的精度高、高可靠性需求，细化标准内容，涵盖设备基础定位、连接紧固、密封性能、尺寸偏差等关键指标，明确各指标的量化要求与检测方法，避免模糊表述带来的执行偏差。强化标准的针对性，根据不同类型核电设备（如反应堆压力容器、蒸汽发生器、主泵等）的结构特性与安装工艺，制定专项标准规范，明确特殊工序的操作要点与质量控制参数。保持标准的动态优化，结合行业技术发展与安装经验积累，及时更新标准内容，吸纳新型安装技术、检测手段的应用要求，确保标准始终与技术发展同步，为安装质量提供精准、全面的依据。并应注重标准的可操作性，将复杂的技术要求转化为清晰、具体的操作指南，方便施工人员理解与执行，确保标准落地见效。

4.2 过程监测与预警体系建设

过程监测与预警体系是防范安装质量隐患的核心手段，需构建全方位、多层次监测网络。监测内容聚焦几何尺寸偏差、连接紧固力矩、焊接接头质量、设备水平度与垂直度等关键质量指标，依托高精度测量仪器、无损检测技术实现实时数据采集^[5]。建立监测数据实时分析机制，通过设定科学的质量控制阈值，动态研判数据异常波动，精准识别超允许范围的质量隐患。构建分级预警机制，按风险严重程度划分预警等级，明确各等级响应流程与处置措施，确保隐患在萌芽阶段高效管控。强化监测数据追溯管理，建立完整数据档案，为质量问题溯源、安装工艺优化提供可靠依据，筑牢质量管控的过程防线。

4.3 质量验收与评价体系优化

质量验收与评价体系是质量保障的闭环关键，需重点提升验收精准性与评价系统性。验收流程上，细化单机试运、系统联调、整体调试等分阶段验收节点，明确各阶段验收项目、方法及合格标准，采用抽样检测与全面检验相结合的方式，保障验收结果真实可靠。评价指标体系构建中，在传统合格率、返修率等指标基础上，新增设备运行稳定性、安装工艺一致性、质量风险防控有效性等深层次指标，形成多维度、立体化评价框架。建立评价结果反馈机制，将发现的问题及时反馈至前端安装环节，推动工艺优化与管控措施完善，实现质量持续改进。同时强化验收与评价的独立性与公正性，确保结果客观反映安装质量实际水平，形成完整的质量管控闭环。

结束语：核机械设备安装质量直接关系到核电项目的安全性能与长期运营效益，其复杂性与特殊性决定了质量管控的必要性与艰巨性。本文通过对安装核心特性与技术要求的梳理，明确了质量控制的关键方向；通过对基础施工、设备对接等五大类常见问题的成因剖析，为问题治理提供了靶向依据；所提出的针对性应对策略及质量保障体系，形成了全流程、多层次的质量管控方案。未来，随着核电技术的不断发展，需持续优化安装工艺与质量管控手段，强化新技术、新设备的应用，进一步提升安装质量的稳定性与可靠性。

参考文献：

- [1]何朝文.核电施工过程中机械设备安装要点分析与应用[J].大众科学,2024,45(1):113-115.
- [2]王叶.核电站机械设备安装施工管理的问题及对策分析[J].电脑乐园,2023(4):0085-0087.
- [3]陈俊阳.核电站机械设备安装施工管理的策略探究[J].中国设备工程,2024,(17):61-63
- [4]马明达.核电站机械设备安装施工管理的问题及对策分析[J].中国设备工程,2023(9):55-57.
- [5]温亮,李盛杰,顾明洲,彭跃.机械设备故障安全在核电厂中的应用探讨[J].山东电力技术,2021,48(04):68-71.